

# OPTIMASI KEBUTUHAN STEAM EVAPORATOR 2 TINGKAT ARUS LAWAN ARAH

Oleh :

Arief Budiman \*)

## Intisari

Optimasi kebutuhan steam pada evaporator dua tingkat arus lawan arah dilakukan dengan cara Golden Section. Sebelum dilakukan optimasi perlu dilakukan penerapan algoritma pemilihan ubahan perancangan. Dari hasil penerapan algoritma didapatkan satu ubahan recycle dan juga didapat urutan berhitung yang baik.

## Pengantar

Evaporator adalah alat yang digunakan untuk operasi pemekatan suatu larutan dengan jalan menguapkan sebagian cairan yang ada. Untuk menghemat steam, pengoperasian evaporator dapat dilakukan lebih dari satu alat (multiple effect evaporator). Evaporator yang satu diletakkan di belakang yang lain, sehingga uap yang ke luar dari evaporator pertama dipakai sebagai medium pemanas pada evaporator berikutnya.

Untuk memperkirakan kebutuhan steam yang optimum perlu dilakukan optimasi. Optimasi dapat dijalankan untuk satu atau lebih peubah bebas. Salah satu cara optimasi dengan satu peubah bebas yang banyak dipakai adalah cara Golden Section. Cara ini dapat dipakai setelah dilakukan penerapan algoritma pemilihan ubahan perancangan pada persamaan-persamaan yang ada.

## Algoritma Pemilihan Ubahan Perancangan

Langkah pertama yang perlu dilakukan sebelum dilakukan optimasi adalah menyusun persamaan-persamaan perancangan. Dari penerapan algoritma pemilihan ubahan perancangan akan didapat urutan persamaan yang baik sehingga hitungan dapat di-

jalankan. Dari penerapan algoritma juga akan dapat diketahui ada tidaknya *ubahan recycle* dalam suatu system yang dikaitkan dengan *flow reversal* pada diagram informasi.

Hubungan jumlah ubahan dengan persamaan dilukiskan dengan :

$$F = V - R$$

dengan F = Jumlah derajat kebebasan

V = Jumlah ubahan

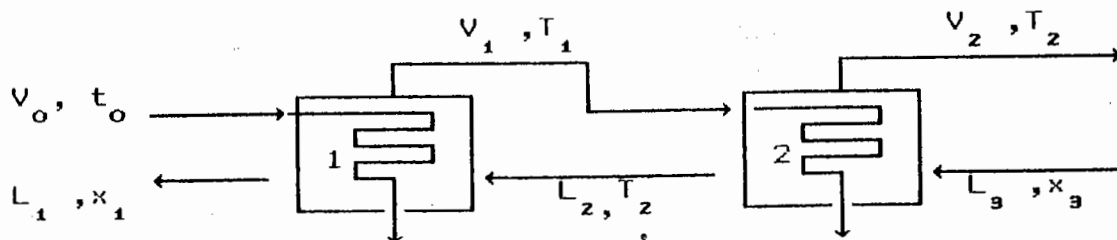
R = Jumlah persamaan atau hubungan bebas.

Derajat kebebasan dibedakan atas :

1. Yang ditentukan lingkungan (ubahan lingkungan), yaitu derajat kebebasan yang ditentukan sekeliling (misal suhu air pendingin) atau ditentukan oleh keadaan alat sebelum dan sesudahnya (misal komposisi umpan atau hasil).
2. Yang ditentukan perancang (ubahan perancangan atau derajat kebebasan ekonomi). Ubahan ini dipakai untuk mendapatkan jawaban yang optimum.

Untuk menyusun persamaan perancangan dibuat model sebagai berikut :

\*) Staf Pengajar Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UGM.



- Asumsi :
1.  $x_1, x_2$  harganya tertentu.
  2. Koefisien perpindahan panas  $U$ , panas penguapan  $\lambda$  dan kapasitas panas  $C_p$  harganya konstan.
  3. Kenaikan titik didih diabaikan.
  4. Suhu reference  $0^\circ\text{C}$ .

Persamaan stage 1 :

	no. pers	ubahan
$V_0 \cdot \lambda + L_1 \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = V_1 \cdot \lambda$	1.	7
$L_2 = L_1 + V_1$	2.	1
$V_0 \cdot \lambda = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta t_1$	3.	3
$\Delta t_1 = t_0 - T_1$	4.	1

Persamaan stage :

	no. pers	ubahan
$V_1 \cdot \lambda + L_2 \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2) = V_2 \cdot \lambda$	5.	2
$L_3 = L_2 + V_2$	6.	1
$V_1 \cdot \lambda = U_2 \cdot A_2 \cdot \Delta t_2$	7.	3
$\Delta t_2 = T_1 - T_2$	8.	0
		18

Jumlah ubahan =  $V = 18$

Jumlah persamaan =  $R = 8$

$F = V - R = 18 - 8 = 10$

Dari 10 derajat kebebasan, maka dalam optimasi kebutuhan steam untuk evaporator 2 tingkat, ditentukan ubahan lingkungan sebanyak 9, yaitu :

1.  $\lambda = 1.000 \text{ BTU/lb}$
2.  $T_2 = 115^\circ \text{F}$
3.  $t_0 = 250^\circ \text{F}$
4.  $C_p = 1 \text{ BTU/lb}^\circ \text{F}$

5.  $L_3 = 100.000 \text{ lb/j}$
6.  $L_1 = 50.000 \text{ lb/j}$
7.  $t_3 = 110^\circ \text{F}$
8.  $U_1 = 100 \text{ BTU/ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}$
9.  $U_2 = 100 \text{ BTU/ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}$

sehingga ubahan perancangannya tinggal 1.

Di samping ubahan di atas ada dua ubahan yang diketahui harganya, yaitu  $x_1 = 0,035$  dan  $x_2 = 0,07$ .

Urut-urutan berhitung dapat dicari dengan cara sebagai berikut :

1. Susunlah sebuah tabel dengan persamaan-persamaan yang ada sebagai baris dan ubahan sebagai kolom dengan menghilangkan ubahan yang diketahui harganya. Beri tanda x pada baris dan kolom bila persamaan memuat ubahan.
2. Pilih kolom yang memuat hanya sebuah x dan coret kolom dan baris yang bersangkutan (ubahan menjadi output bagi persamaan tersebut).
3. Ulangi langkah 2 sampai ubahan habis.
4. Yang tidak tercoret adalah ubahan perancangan.
5. Bila pencoretan tidak dapat diteruskan karena tidak ada kolom yang memuat satu x, coret sebuah persamaan sehingga menghasilkan sebuah x dalam kolom.
6. Ulangi langkah 2 dan bila macet lagi coret sebuah/lebih persamaan.
7. Ubahan yang tidak tercoret adalah ubahan perancangan dan *ubahan recycle*. Jumlah *ubahan recycle* sama dengan jumlah persamaan yang dicoret tanpa mencoret ubahan.

	$L_2$	$V_1$	$V_0$	$A_1$	$\Delta t_1$	$T_1$	$V_2$	$A_2$	$\Delta t_2$	
1.	---	X	X	---	---	X	---	---	---	2a $\rightarrow V_0$
2.	X	X	---	---	---	---	---	---	---	3 RV $\rightarrow L_2$
3.	---	---	X	X	X	---	---	---	---	1 b $\rightarrow A_1$
4.	---	---	---	---	X	X	---	---	---	2 b $\rightarrow \Delta t_1$
5.	X	X	---	---	---	---	X	---	---	4 $\rightarrow V_1$
6.	X	---	---	---	---	---	X	---	---	5 $\rightarrow V_2$
7.	---	X	---	---	---	---	---	X	X	1 a $\rightarrow A_2$
8.	---	---	---	---	---	X	---	---	X	2 c $\rightarrow \Delta t_2$

Dari hasil pencoretan didapat urutan berhitung, yang merupakan kebalikan urutan mencoret, sebagai berikut :

$$1. V_2 = L_3 - L_2$$

$$2. V_1 = \frac{V_2 \cdot \lambda - L_2 \cdot C_p \cdot (T_3 - T_2)}{\lambda}$$

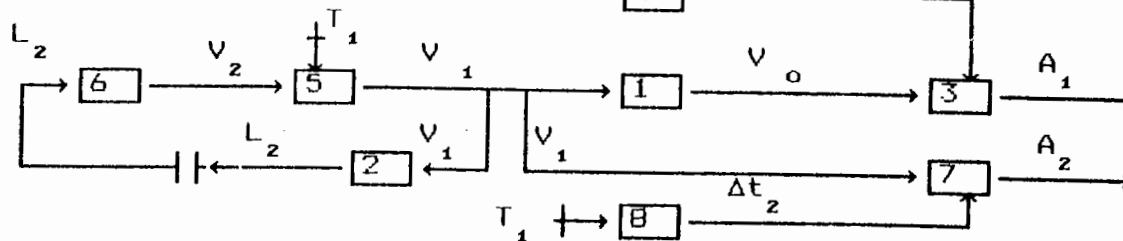
$$3. L_2 = L_1 + V_1$$

$$4a. V_0 = \frac{V_1 \cdot \lambda - L_1 \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)}{\lambda}$$

$$4b. \Delta t_1 = t_0 - T_1$$

$$4c. \Delta t_2 = T_1 - T_2$$

$$5a. A_2 = \frac{V_1 \cdot \lambda}{U_2 \cdot \Delta t_2}$$



Dari hasil pencoretan didapat satu ubahan perancangan yaitu,  $T_1$ . Untuk menentukan harga  $T_1$  yang optimum digunakan cara *Golden Section*.

Dari urutan berhitung akan dapat dibuat program komputer. *Flow chart* yang telah dibuat dapat dilihat pada lampiran. Sedangkan hasil optimasi dapat dilihat pada tabel berikut :

$T_1$ A, °F	$V_0$ A, lb/j	$T_1$ B, °F	$V_0$ B, lb/j
166.5654	27766.25	198.4346	29359.7
146.8692	26781.43	166.5654	27766.25
134.6962	26172.78	146.8692	26781.43
127.1729	25796.62	134.6962	26172.78
122.5233	25564.14	127.1729	25796.62
119.6497	25420.46	122.5233	25564.14
117.8736	25331.66	119.6497	25420.46
116.776	25276.77	117.8736	25331.66
116.0976	25242.85	116.776	25276.77
115.6784	25221.89	116.0976	25242.85
115.4193	25208.94	115.6784	25221.89
115.2591	25200.93	115.4193	25208.94
115.2096	25198.45	115.2096	25198.45

$$5b. A = \frac{V_0 \cdot \lambda}{U_1 \cdot \Delta t_1}$$

dengan :

$V_0, V_1$  = kecepatan steam masuk efek 1,2 (lb/jam)

$V_2$  = kecepatan steam keluar efek 2 (lb/jam)

$L_1$  = kecepatan cairan keluar efek 1 (lb/jam)

$L_2, L_3$  = kecepatan cairan masuk efek 1,2 (lb/jam)

$A_1, A_2$  = luas perpindahan panas efek 1,2 (ft<sup>2</sup>)

$t_0, T_1$  = suhu steam masuk efek 1,2 (°F)

$T_2$  = suhu steam keluar efek 2 (°F)

RV = recycle variable

diagram informasinya adalah :

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa  $T_1$  dan  $V_0$  minimum untuk sistem dan kondisi yang dipelajari berturut-turut 115,2096 °F dan 25198,45 lb/jam.

## Kesimpulan

1. Pada penerapan algoritma didapatkan :

- Jumlah ubahan = 18
- Jumlah persamaan = 8
- Jumlah ubahan lingkungan = 9
- Jumlah ubahan perancangan = 1
- Jumlah ubahan recycle = 1

2. Jika harga-harga ubahan lingkungan sebagai berikut :

$$\lambda = 1.000 \text{ BTU/lb}$$

$$T_2 = 115 \text{ °F}$$

$$t_0 = 250 \text{ °F}$$

$$C_p = 1 \text{ BTU/lb °F}$$

$$L_3 = 100.000 \text{ lb/j}$$

$$L_1 = 50.000 \text{ lb/j}$$

$$T_3 = 110\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$U_1 = U_2 = 100\text{ BTU/ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$$

dengan cara Golden section didapat harga  $T_1$  minimum = 115,21  $^{\circ}\text{F}$ , dan kebutuhan steam minimum = 25.198,45 lb/j.

#### Daftar Pustaka

Brown, G.G., 1950, "Unit Operation", pp. 474-492, John Wiley and Sons, Inc., New York.

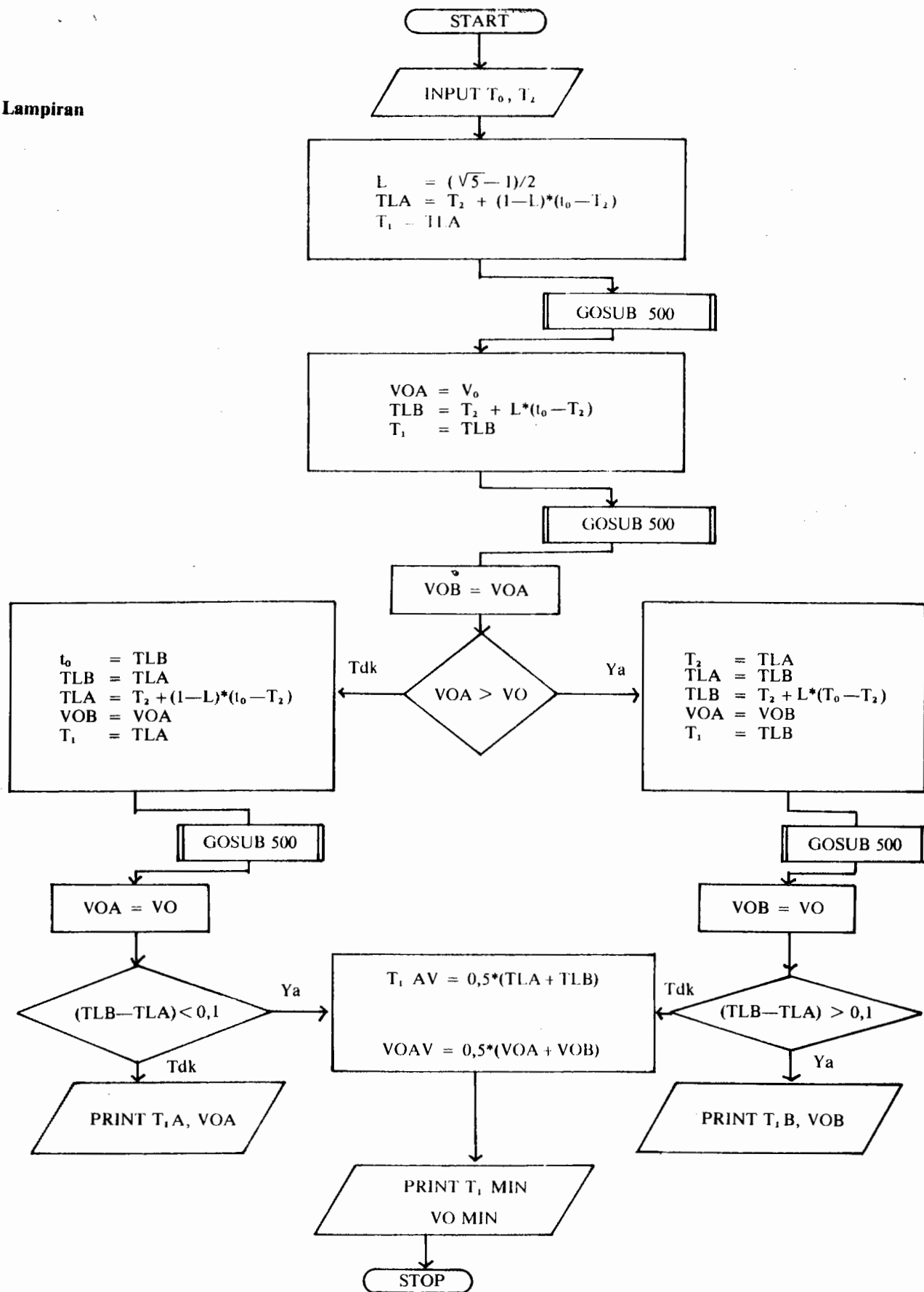
Rudd, D.F. and Watson, C.C., 1968, "Strategy of Process Engineering", pp. 153-187, John Wiley and Sons, Inc., New York.

Soegiarto, 1984, "Penerapan Algoritma Pemilihan Perubah Perancangan Pada Perancangan Dasar Kipas Pompa Sentrifugal", Perpustakaan Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.

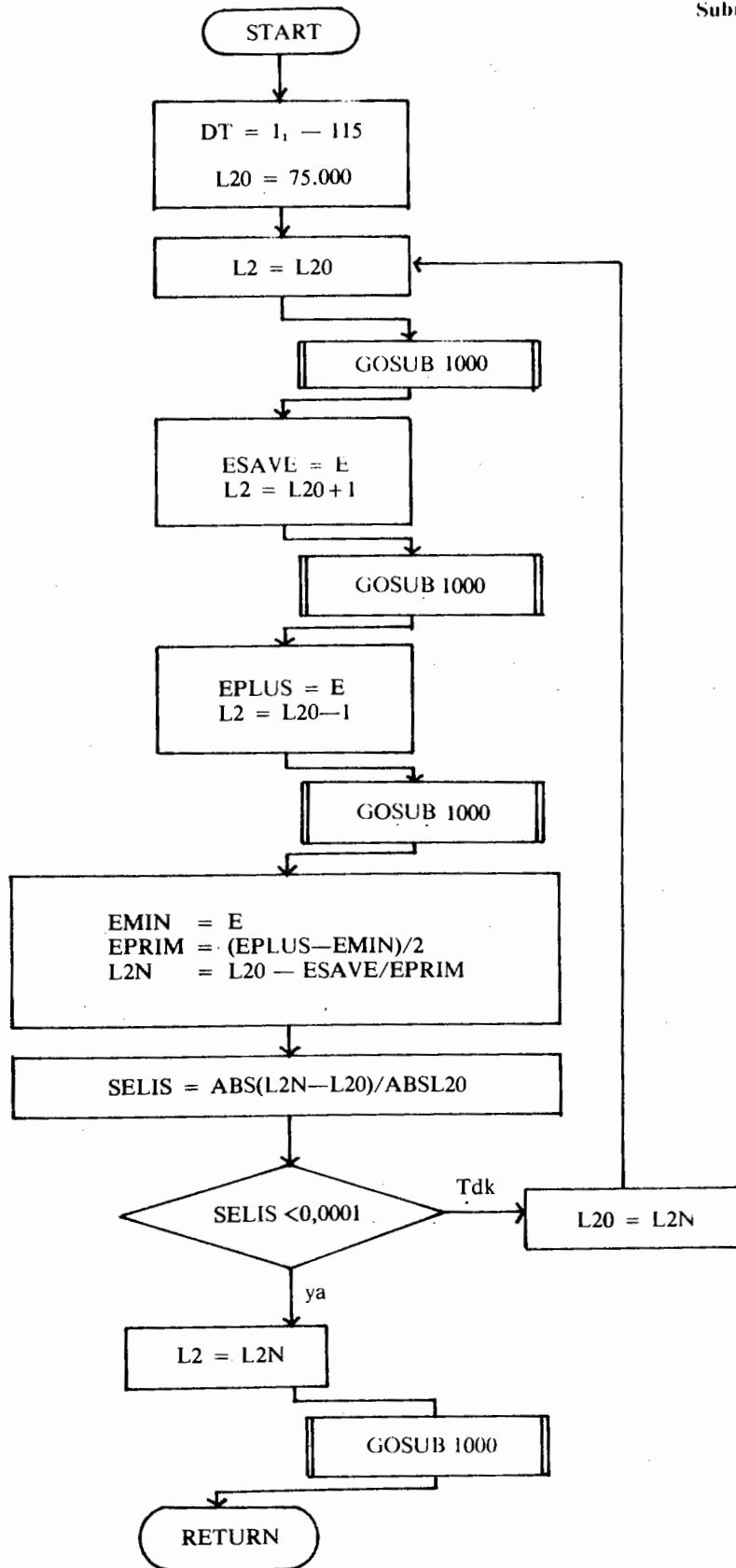
Soegiarto, 1990, "Analisis Sistem Teknik Kimia", hal. 5 — 8 Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM Yogyakarta.

#### Ucapan Terimakasih :

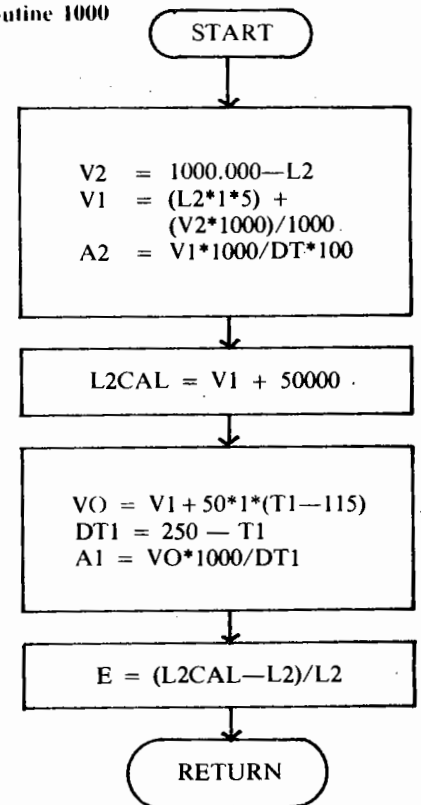
Pada kesempatan ini penyusun mengucapkan terima kasih kepada Bp. Dr. Ir. Wahyudi Budi Sediawan SU yang telah memberikan bimbingan dari awal, sehingga naskah ini dapat tersusun.



# Subroutine 500



# Subroutine 1000



# PENGARUH SUHU DAN KELEMBABAN TANAH TERHADAP *WATER TREEING* PADA KABEL POLIMER BAWAH TANAH

Oleh :

Ir. Soedjatmiko, M.Sc. \*)

## Intisari

Sebagian besar gangguan listrik pada kabel polimer bawah tanah di Indonesia disebabkan oleh *water treeing*. Air merembes ke dalam bahan isolasi melalui proses difusi. *Water treeing* menurunkan kuat dielektrik kabel. Tegangan tembus kabel akan menurun dan *loss tangent* akan naik. Di Indonesia penelitian di bidang ini belum banyak dilakukan.

Penelitian dilakukan dengan membuat model tanah lingkungan tempat kabel ditanam dengan suhu dan tingkat kelembaban yang dapat diatur. Pada benda uji (kabel polimer) ditentukan sejumlah titik uji yang diberi lobang kecil dan diisi dengan cairan NaCl yang akan berfungsi sebagai elektrode air. Kuat medan listrik terpasang adalah 2,5 kV/mm. Pada setiap titik uji diambil satu irisan tipis benda uji setebal 0,25 mm dan dianalisis secara mikroskopis.

Analisis hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh perubahan suhu terhadap pertumbuhan *water treeing* relatif kecil. Tingkat kelembaban tanah di atas 60% sangat memudahkan pertumbuhan *water treeing*.

## Pendahuluan

Di daerah-daerah padat penduduk dan industri, jaringan tenaga listrik sebaiknya menggunakan kabel listrik bawah tanah agar keindahan dan kesehatan lingkungan serta keselamatan penduduk terjaga.

Dalam penggunaan kabel polimer bawah tanah banyak faktor yang perlu dipahami dan dipertimbangkan, di antaranya adalah impedans termal kabel, karakteristik bahan isolasinya, pengaruh panas terhadap hambatan kabel, penurunan kemampuan kabel dalam menyalurkan arus, dan kelembaban lingkungan tempat kabel berada. tingkat kelembaban lingkungan yang tinggi akan mudah menimbulkan *water treeing*. *Water treeing* ini akan menurunkan kuat dielektrik kabel. Kegagalan isolasi kabel dapat terjadi pada arus tegangan yang lebih rendah. Dengan demikian umur pakai kabel menjadi lebih pendek.

Di Indonesia sebagian besar kegagalan kabel bawah tanah disebabkan oleh *water treeing*. Kabel bawah laut dan kabel yang ditanam di daerah pantai paling sering mengalami gangguan yang diakibatkan oleh *water treeing* ini. Banyak usaha yang telah

dilakukan untuk mengatasi masalah ini, tetapi usaha-usaha tersebut belum sepenuhnya dapat menghilangkan atau mencegah pertumbuhan *water treeing* karena pembentukan dan kecepatan rambatannya dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor-faktor yang dominan di antaranya adalah besar medan listrik, cairan polar dan non-polar, konsentrasi cairan dan jenis garam yang terdapat di dalam cairan. Besar tegangan terpasang dan keadaan lingkungan tempat kabel berada memegang peranan penting. Di samping itu faktor internal kabel, misalnya *microvoids* yang terbentuk pada saat proses pembuatan kabel, juga dapat mempengaruhi pertumbuhan pohonan air. Unsur-unsur yang berpengaruh terhadap proses pertumbuhan pohonan air cukup banyak. Masih banyak faktor-faktor lain yang belum diketahui. Oleh karena itu tidak mengherankan kalau sampai saat ini para peneliti di bidang isolasi kabel bawah tanah belum dapat memahami secara jelas dan pasti tentang mekanisme pertumbuhan *water treeing*.

Karakteristik dielektrik kabel polimer untuk pemakaian luar gedung atau bawah tanah pada tegangan yang cukup tinggi sangat dipengaruhi oleh keadaan lingkungan tempat kabel tersebut. Pada tanah dengan tingkat kelembaban yang tinggi, air

\*) Staf Pengajar Jurusan T. Elektro FT UGM.

dapat merembes ke dalam bahan isolasi kabel. Perembesan ini diakibatkan oleh berbagai proses fisis, terutama proses difusi. Air yang telah merembes ke dalam bahan isolasi kabel akan memudahkan pembentukan *water treeing*. Apabila tegangan listrik yang cukup tinggi dikenakan pada kabel polimer yang telah mengalami rembesan air, maka air dapat berfungsi sebagai elektrode sehingga pembentukan *water treeing* tidak dapat dicegah lagi. Keadaan yang demikian ini akan menimbulkan degradasi sifat listrik bahan isolasi kabel tersebut. Beberapa sifat listrik yang perlu diperhatikan adalah penurunan kuat tembus atau penurunan tegangan gagal, kenaikan permitivitas, dan kenaikan *loss tangent* (Bahder, 1983). Di samping itu, perembesan air juga dapat menimbulkan reaksi kimia sebagai akibat proses hidrolisis atau ketidak-murnian cairan (Kiersztyn, 1981). Reaksi kimia ini akan menimbulkan hantaran elektrolitik yang sangat merugikan sifat dielektrik bahan isolasi kabel (Karmer, 1987, Rittmann, 1976, dan McKean, 1976).

Kabel polimer yang ditanam di tanah lembab pada suhu tertentu akan mengalami resapan air. Proses resapan ini pada dasarnya disebabkan oleh perbedaan tekanan parsial antara isolator dengan sekelilingnya. Molekul air mulai meresap pada permukaan isolator, kemudian menyebar ke bagian-bagian lain dalam isolator melalui proses difusi. Untuk kabel tanah, proses difusi ini akan berhenti setelah terjadi keseimbangan tekanan air di dalam isolator dan tanah. Tingkat resapan air dan kecepatan difusi sangat dipengaruhi oleh jenis bahan isolasinya, suhu, dan kelembaban lingkungan (Crank, dkk., 1968 dan Krevelen, 1972). Untuk bahan isolasi polimer yang tidak menggunakan *filler*, koefisien difusi dapat dianggap tetap.

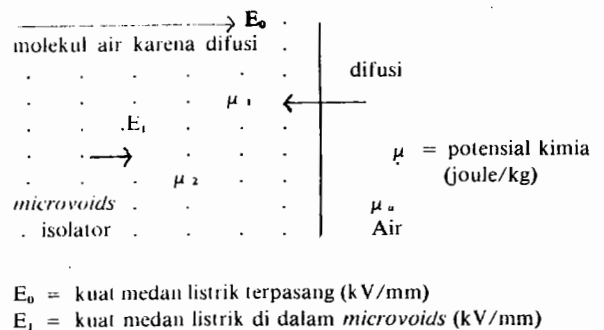
Jika tegangan tinggi dikenakan pada kabel polimer yang ditanam di tanah lembab, maka air pada permukaan isolator dapat sebagai elektrode. Medan listrik yang terjadi akan menyebabkan pembentukan *water treeing*. *Water treeing* ini mulai muncul kira-kira 2 detik setelah tegangan terpasang dan mengakibatkan kenaikan *loss tangent* dan penurunan tegangan tembus isolator tersebut (Favrie, 1980, Sletbak, 1979, Eichhorn, 1979, Nagasaki, 1984, dan Tanaka 1976).

Sampai saat ini mekanisme pertumbuhan *water treeing* belum diketahui secara pasti. Ciri-ciri *water treeing* yang telah diketahui adalah :

- Water treeing* muncul dan berkembang dari unsur ketidak-murnian yang ada di isolator,

- Water treeing* terdiri atas *microvoids* yang mengandung air,
- Water treeing* berkembang tanpa lucutan parsial,
- Perkembangan *water treeing* dapat dipengaruhi oleh perubahan frekuensi tegangan terpasang,
- Water treeing* akan hilang jika bahan isolasinya dikeringkan tetapi akan muncul kembali apabila dimasukkan ke dalam air.

*Microvoids* di dalam isolator memegang peranan penting dalam proses pembentukan *water treeing*. Gambar 1 berikut melukiskan sebuah model isolator dalam air.



Gambar 1. Model isolator dalam air

Air merembes ke dalam isolator melalui proses difusi. Besar potensial kimia air yang merembes dinyatakan oleh  $\mu_1$  (joule/kg), sedangkan  $\mu_2$  menunjukkan potensial kimia air di dalam *microvoids*. Hubungan antara potensial kimia dengan kuat medan terpasang ditunjukkan oleh persamaan berikut (Sletbak, 1976) :

$$\mu = \mu_0 - \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial f} \right]_T \dots \dots \dots (1)$$

dengan  $\epsilon_0$  = tetapan dielektrik ruang hampa  
 $= 8.85 \times 10^{-12}$  F/m  
 $f$  = kerapatan air (kg/m<sup>3</sup>)

Kecepatan perubahan potensial kimia lebih besar daripada kecepatan difusi air dalam isolator. Proses difusi akan berhenti apabila telah tercapai keseimbangan potensial kimia. Dalam keadaan ini  $f_1 = f_2 = f_0$ .

Nilai potensial kimia air dalam *microvoids* dapat ditentukan sebagai berikut



$$\epsilon_2 = 1,8 + K_0 \int \dots \dots \dots (2)$$

dengan konstanta molekul air  $K_0 = 7,9 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{kg}$

$$\mu_2 = \mu_0 - \frac{1}{2} \epsilon_0 K_0 E_1^2 \dots \dots \dots (3)$$

Medan listrik yang dikenakan pada isolator akan menyebabkan bentuk *microvoid* tidak bulat tetapi cenderung berbentuk sferis. Dalam hal ini kuat medannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E_1 = \frac{3 \epsilon_1}{E_2^* + 2 \epsilon_1} E_0 \dots \dots \dots (4)$$

Dengan demikian potensial kimia air di dalam *microvoid* adalah

$$\mu_2 = \mu_0 - \frac{1}{2} \epsilon_0 K_0 \left[ \frac{3 \epsilon_1}{E_2^* + 2 \epsilon_1} E_0 \right]^2 \dots \dots \dots (5)$$

dengan kapasitas induktif air  $\epsilon_2^* = \epsilon_2 - j\sigma/\omega\epsilon_0$

$\sigma$  = hantaran air ( $\Omega^{-1}\text{-m}$ )

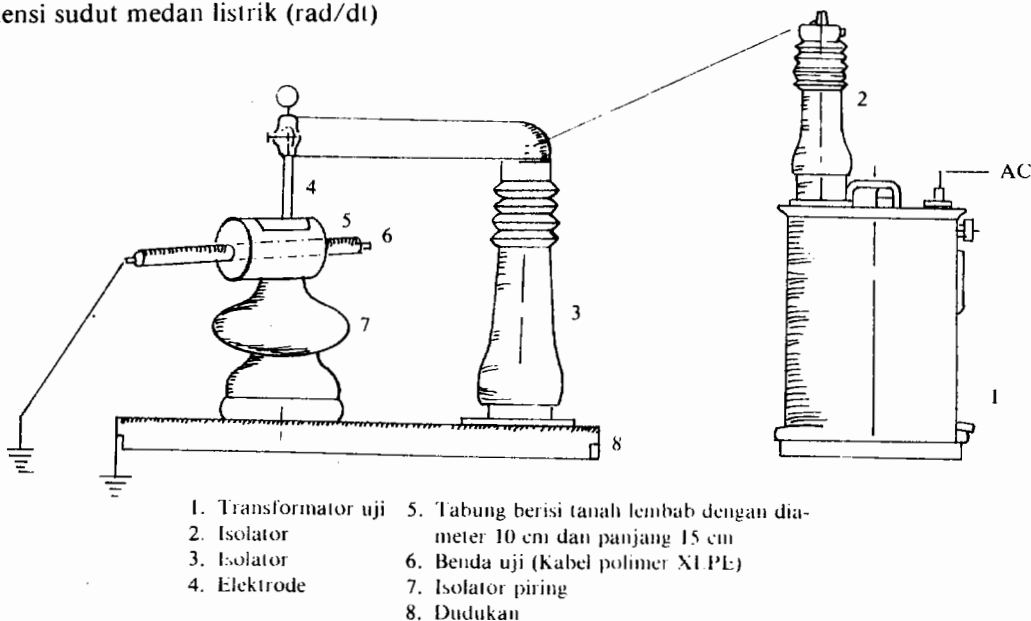
$\omega$  = frekuensi sudut medan listrik ( $\text{rad/dt}$ )

*Microvoids* yang berada dalam medan listrik yang kuat akan menimbulkan tekanan mekanis yang cukup besar terhadap sekelilingnya. Tekanan ini dapat melebihi kekuatan mekanis bahan isolasinya. Apabila hal ini terjadi, maka akan timbul retakan atau kanal di dalam isolator. Kanal ini dapat menjalar ke arah longitudinal. Jika kanal ini terisi air yang berasal dari sekelilingnya, maka akan timbul kanal-kanal baru. Proses ini dapat berlangsung terus sehingga berbentuk *water treeing* yang akhirnya akan menimbulkan degradasi sifat listrik bahan isolasinya.

#### Pelaksanaan Penelitian

Bahan uji yang dipakai dalam penelitian ini adalah bahan isolasi polimer XLPE (*crosslinked polyethylene*) yang diperoleh di pasaran dalam negeri.

Susunan alat yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada rangkaian percobaan di bawah ini.



Gambar 2. Rangkaian percobaan

Pelaksanaan penelitian dibagi menjadi dua tahap, yaitu:

### 1. Tahap-1 :

Pada tahap ini dua jenis percobaan dilakukan dengan tujuan mengetahui pengaruh perubahan suhu dan kelembaban tanah terhadap pertumbuhan *water treeing*. Sebelum tegangan tinggi AC dikenakan pada benda uji, pada setiap titik uji dibuat sebuah lubang kecil. Kemudian cairan NaCl dimasukkan ke dalam lubang ini. Elektrode jarum dari sumber tegangan tinggi dimasukkan ke dalam lubang kecil yang telah terisi cairan NaCl. Dengan demikian cairan NaCl tersebut dapat berfungsi sebagai elektrode air. Ujung elektrode air akan menjadi titik awal pertumbuhan *water treeing*. Penghantar kabel dihubungkan ke tanah.

- Pada tingkat kelembaban tanah sebesar 74% suhu diubah-ubah dari 25°C sampai dengan 65°C dengan interval 10°C. Tingkat kelembaban tanah diukur dengan *hygrometer* (Hordeski, 1985) sedangkan suhu diukur dengan termokopel. Pada setiap suhu uji tersebut tegangan tinggi AC 20 kV dikenakan pada titik uji. Pada suhu yang berbeda diharapkan terjadi perbedaan pertumbuhan *water treeing*.
- Pada suhu 26°C tingkat kelembaban tanah diubah-ubah dari 60% sampai dengan 90% dengan interval 5%. Pada setiap tingkat kelembaban tanah tegangan tinggi AC 20 kV dikenakan pada titik uji. Pada tingkat kelembaban tanah yang berbeda diharapkan *water treeing* yang timbul juga berbeda.

### 2. Tahap-2 :

Pada tahap ini pengamatan mikroskopik dilakukan. Pada setiap titik uji irisan tipis setebal 0,25 mm dibuat dengan menggunakan *microtome*. irisan tipis ini kemudian direndam dalam larutan *rhodamin* dalam air (7 g/l) selama 12 jam. Larutan kimia ini berfungsi sebagai larutan pewarna agar *water treeing* yang timbul dapat diamati. Panjang rerata *water treeing* pada setiap titik uji diukur dan pesat perambatannya dapat diperkirakan.

## Hasil Penelitian dan Pembahasan

Hasil pengamatan mikroskopik tercantum pada tabel 1 dan tabel 2. Tabel 1 menunjukkan pengaruh perubahan suhu terhadap panjang rerata *water treeing* yang terjadi pada tingkat kelembaban tanah sebesar 74%. Sedangkan tabel 2 memperlihatkan pengaruh perubahan kelembaban tanah terhadap panjang rerata *water treeing* yang muncul pada suhu 26°C. Dari kedua data tersebut diperoleh empat macam grafik seperti yang tampak pada gambar 3 sampai dengan gambar 6. Masing-masing gambar secara berurutan menunjukkan pengaruh suhu terhadap pertumbuhan *water treeing*, pengaruh suhu terhadap perubahan pertumbuhan *water treeing*, pengaruh kelembaban tanah terhadap pertumbuhan *water treeing*, dan pengaruh kelembaban tanah terhadap perubahan pertumbuhan *water treeing*.

Tabel 1. Data pengamatan panjang rerata *water treeing* karena pengaruh suhu pada tingkat kelembaban tanah 74%

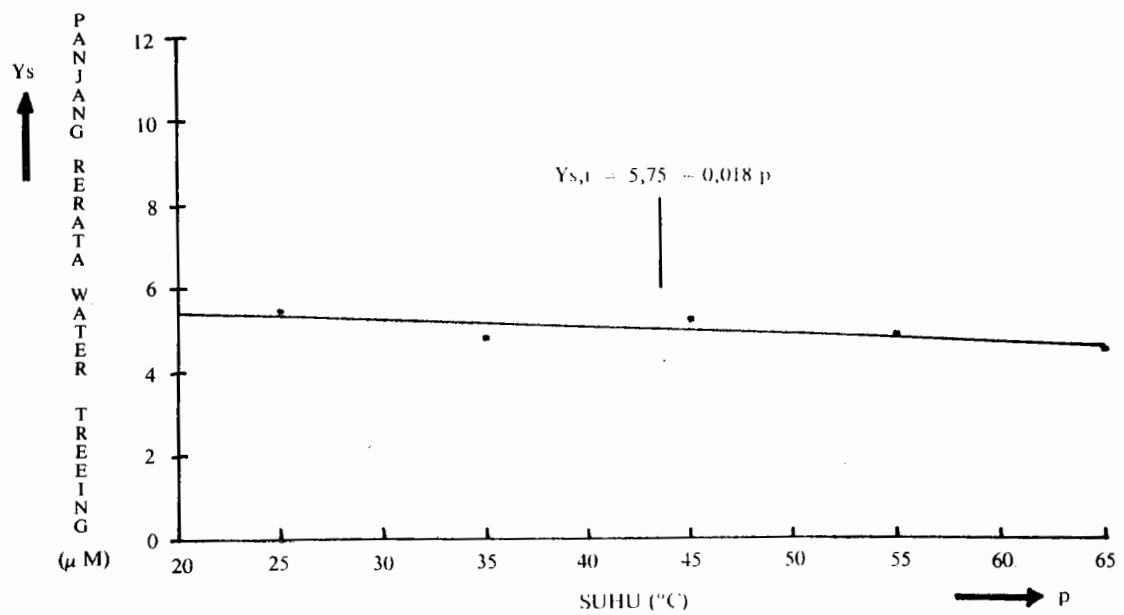
Kelembaban tanah : 74%

No.	Suhu (°C) Tanah	Panjang Rerata Water Treeing (μ m)
1.	25	5,4
2.	35	4,8
3.	45	5,2
4.	55	4,8
5.	65	4,5

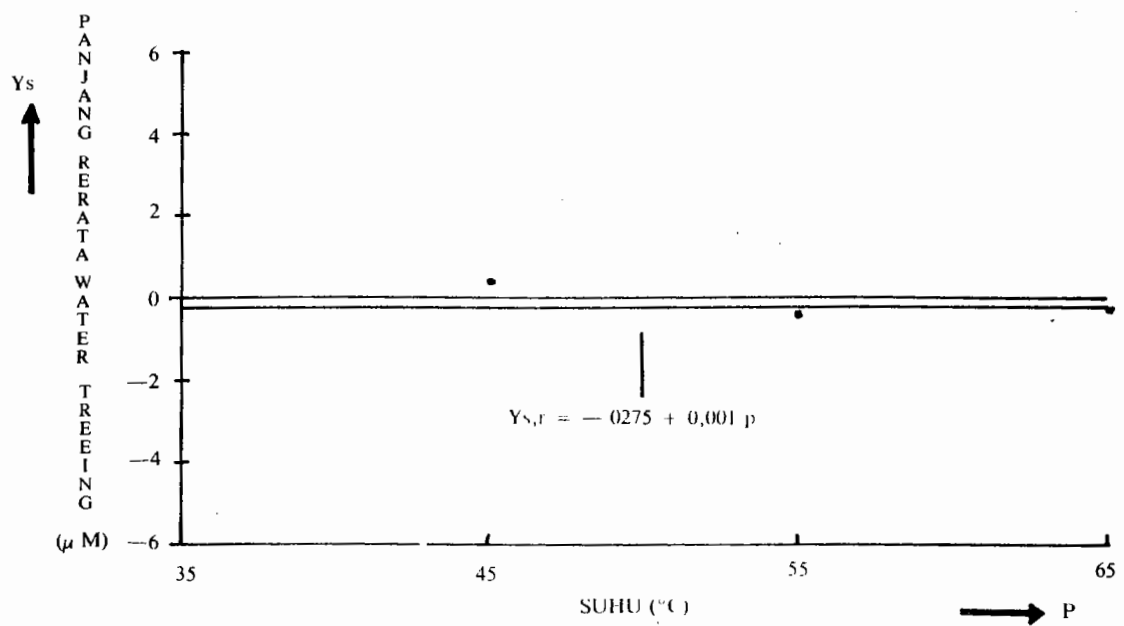
Tabel 2. Data pengamatan panjang rerata *water treeing* karena pengaruh kelembaban tanah pada suhu 26°C

Suhu tanah : 26%

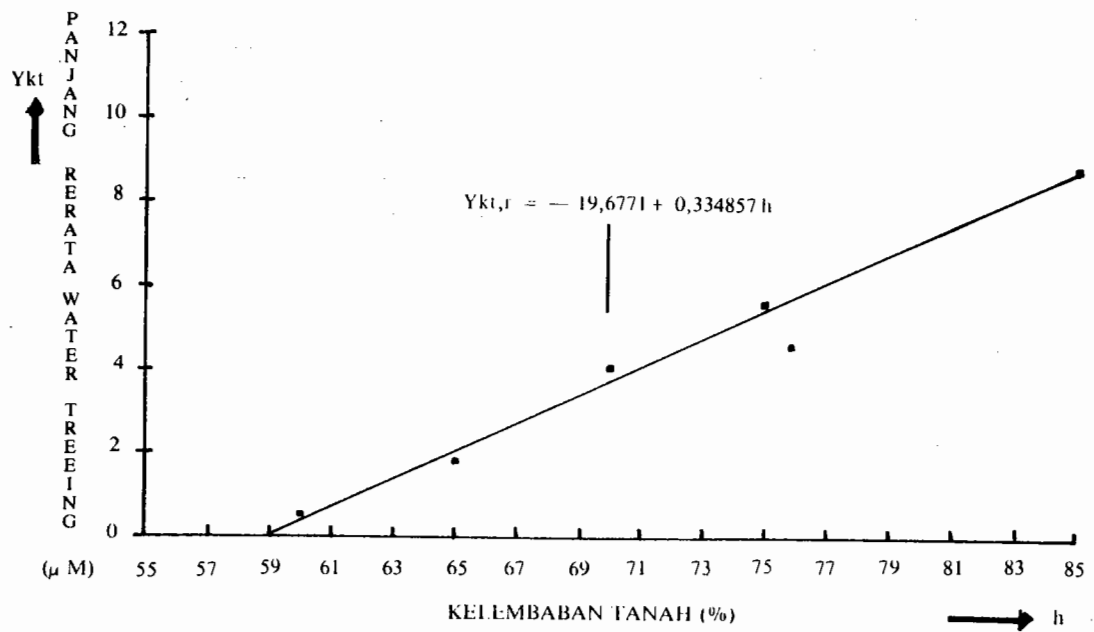
No.	Kelembaban Tanah (%)	Panjang Rerata Water Treeing (μ m)
1.	60	0,5
2.	65	1,8
3.	70	4,0
4.	75	5,5
5.	80	7,0
6.	85	8,8



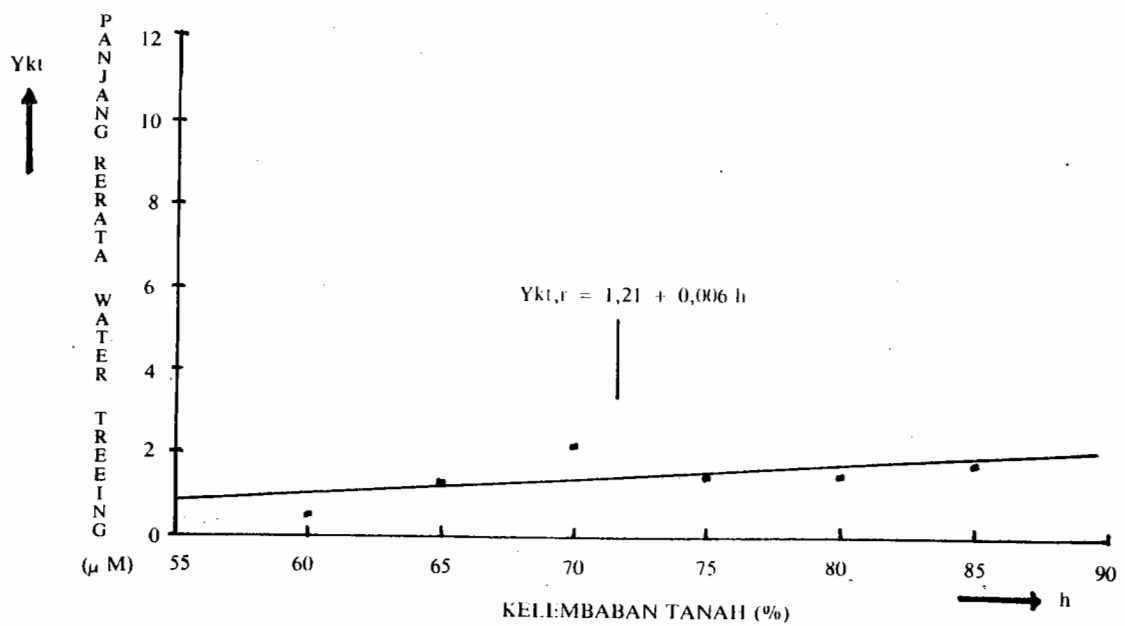
Gambar 3. Pengaruh suhu terhadap pertumbuhan water treeing



Gambar 4. Pengaruh suhu terhadap perubahan pertumbuhan water treeing



Gambar 5. Pengaruh kelembaban tanah terhadap pertumbuhan water treeing



Gambar 6. Pengaruh kelembaban tanah terhadap perubahan pertumbuhan water treeing

Gambar 3 dan gambar 4 menunjukkan bahwa pengaruh perubahan suhu terhadap pertumbuhan *water treeing* relatif kecil. Hal ini dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$Y_{s,r}(p) = 5,75 - 0,018 p$$

$$\Delta Y_{s,r}(p) = -0,275 + 0,001 p$$

dengan  $Y_{s,r}$  = panjang rerata *water treeing* ( $\mu$  m)

$\Delta Y_{s,r}$  = perubahan rerata panjang *water treeing* ( $\mu$  m)

$p$  = suhu ( $^{\circ}$ C)

Daerah variasi panjang rerata untuk seluruh kawasan suhu sebesar  $4,94 \mu$  m. Perubahan absolut panjang rerata *water treeing* berkisar antara  $0,3 \mu$  m sampai dengan  $0,6 \mu$  m.

Perkembangan *water treeing* sangat dipengaruhi oleh kecepatan perkembangan *microvoids* di dalam bahan isolasi polimer yang berisi air. Kerapatan *microvoids* menentukan tingkat perkembangan *water treeing*. Hasil penelitian memberikan kesan bahwa kerapatan *microvoids* tidak begitu terpengaruh oleh perubahan suhu. Ada kemungkinan bahwa perubahan-perubahan kecil panjang *water treeing* disebabkan oleh perubahan kerapatan *microvoids* yang diameternya sangat kecil dan labil.

Gambar 5 dan 6 menunjukkan bahwa kelembaban tanah tempat kabel polimer ditanam sangat berpengaruh terhadap proses pertumbuhan *water treeing*. Pengaruh kelembaban tanah tersebut ditunjukkan oleh persamaan-persamaan di bawah ini.

$$Y_{kt,r(h)} = -19,6771 + 0,334857 h$$

$$\Delta Y_{kt,r(h)} = 1,21 + 0,006 h$$

dengan  $Y_{kt,r}$  = panjang rerata *water treeing* ( $\mu$  m)

$\Delta Y_{kt,r}$  = perubahan rerata panjang *water treeing* ( $\mu$  m)

$h$  = kelembaban tanah (%)

*Water treeing* muncul pada tingkat kelembaban tanah 60%. Kenaikan rerata panjang *water treeing*  $1,46 \mu$  m. Untuk seluruh kawasan tingkat kelembaban tanah yang diteliti perubahan panjang *water treeing* adalah  $8,3 \mu$  m. Perubahan panjang *water treeing* yang terbesar terjadi pada tingkat kelembaban tanah 70%.

Tingkat kelembaban tanah yang tinggi sangat mendorong proses difusi air ke dalam bahan isolasi polimer. Dengan kuat medan listrik terpasang sebesar  $2,5 \text{ kV/mm}$  dan beda potensial kimia yang cukup tinggi, retakan dapat terjadi dengan mudah di dalam bahan isolasi. Sebagai akibatnya *water treeing* berkembang, hambatan isolasi menurun, dan *loss tangent* akan naik. Sifat dielektrik kabel akan mengalami degradasi.

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. *Microvoids* dalam bahan isolasi polimer memegang peranan penting dalam proses pembentukan *water treeing*.
2. Kerapatan *microvoids* tidak begitu terpengaruh oleh perubahan suhu.
3. Pengaruh perubahan suhu lingkungan tempat kabel polimer ditanam terhadap perkembangan *water treeing* relatif kecil.
4. Kelembaban tanah tempat kabel polimer ditanam sangat berpengaruh terhadap tumbuh-kembang *water treeing*.
5. *Water treeing* mulai tumbuh pada tingkat kelembaban 60%. Pesat pertumbuhannya sekitar  $0,06 \mu$  m/menit.

### Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Pimpinan Fakultas Teknik UGM yang telah memberikan dana untuk penelitian ini.
2. Ketua Jurusan Teknik Elektro FT-UGM yang telah menyediakan fasilitas penelitian.
3. Saudara Ismaraman dan Heru Wiryono yang telah membantu peneliti.

### Daftar Pustaka

Bahder, G., 1983, High Voltage XLPE dan EPR insulated cables; Electric breakdown and testing, *IEEE Trans.*, pp. 2173 — 2185.

Eichhorn, R.M., 1976, Water tree growth, permanent inhibition, *IEEE Trans.*, pp. 2215 — 2222.

Favrie, E., 1980, Water treeing effects on electrical properties, *IEEE Trans.*, pp. 1225 — 1274.

Hordeski, M.E., 1985, *Design of microprocessor sensor & control systems*, Reston Publishing Co., Virginia.

Karner, H., 1987, High voltage engineering for electrical energy, *Seminar kerja sama DAAD-UGM*, Yogyakarta.

Kiersztyn, S.E., 1981, Electrical aging of insulation, theory based on chemical reactive rate theory, *IEEE Transp.*, pp. 4333 — 4340.

Mckean, A.L., 1976, Breakdown mechanism in XLPE cables, *IEEE Trans.*, pp. 253 — 260.

Nagasaki, S., 1984, Water tree retardant XLPE cables, *IEEE Trans.*, pp. 536 — 544.

Rittmann, G.W., 1976, Water contamination in cross-linked cable joints, *IEEE Trans.*, pp. 302 — 308.

Sletbak, J., 1976, Water tree initiation and growth, *IEEE Trans.*, pp. 1358 — 1365.

Tanaka, T., 1976, Water tree formation, mechanical stressing during tree formation, lifetime estimation; XLPE and PE cables, *IEEE Trans.*, pp. 1892—1910.